ChinaXiv合作期刊

doi:10.13866/j.azr.2019.02.17

气候因素对科尔沁草地北部牧草生长发育的影响①

高亚敏

（通辽市气象局，内蒙古 通辽 028000）

摘 要： 利用巴雅尔吐胡硕牧业气象试验站牧草和气象观测资料，分析气候因素对科尔沁草地北部牧草生长发育的影响。结果表明：近27 a来研究区气温平均升高0.16 ℃·(10a)$^{-1}$，降水量平均减少23.96 mm·(10a)$^{-1}$，牧草生长季干燥指数平均上升0.15·(10a)$^{-1}$，草地干旱化加剧。羊草（*Leymus chinensis*）、冰草（*Agropyron cristatum*）、委陵菜（*Potentilla chinensis*）返青期延迟，开花期提前，生长季长度缩短；降水量是影响3种植物返青期和枯黄期的主要因素，降水量与三者返青期呈负相关，与其枯黄期呈正相关。草层高度和牧草产量均呈极显著下降趋势（$P<0.01$），年均分别下降0.88 cm和减产121.43 kg·hm^{-2}。草层高度、牧草产量与气温主要呈负相关，与降水量主要呈正相关，表明在气候变暖背景下，随着气温升高，降水减少，水分成为研究区牧草生长发育和产量形成的主要限制因子。根据积分回归模型分析，在牧草返青—展叶期，5月中旬降水量、日照对牧草气象产量影响的正效应达到最大；牧草拔节—开花期，5月下旬至6月中旬是牧草对水分、光照需求的主要阶段，6月下旬至7月中旬是牧草对热量需求的主要阶段；牧草灌浆—成熟期，8月气温对牧草气象产量的影响呈负效应，气温的负效应在8月中旬达到最大。

关键词： 气候因素；牧草生长；物候期；牧草产量；科尔沁草地

草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分，在全球气候变化中扮演着重要角色[1-3]。牧草作为草地植物群落的重要组成部分，对气候变化的响应十分敏感，因此，研究和了解气候因素对牧草生长发育的影响是目前学者关注的焦点之一。20世纪80年代以来，国内许多学者相继开展了典型草原区牧草生长发育与气候条件关系的研究。郭继勋等[4]认为，水分是东北羊草（*Leymus chinensis*）群落产量的主要限制因子。崔鲜一等[5]指出，天然草地牧草生长期间光、温、水因子起着主导作用，产草量与降水量呈正相关关系。郭连云等[6]认为，降水量和气温的组合是影响西北针茅（*Stipa sareptana* var. *krylovii*）产量的主要因子。吴让等[7]研究表明，降水量是限制青海省兴海县天然草地牧草返青和生长发育的主要气象因子。IPCC第三次评估报告指出，在过去的几十年中干旱半干旱区的草地生产力呈持续下降趋势，在温度升高2～4 ℃和降水减少的情况下，草地生产力将会降低40%～90%[8]。孙小龙等[9]研究表明，内蒙古镶黄旗典型草原地上生物量的主要限制因子是降水，其次为年平均最高气温和生长季平均最高气温。

科尔沁草地处于干旱、半干旱地区，降水波动性明显，生态环境脆弱易变，是草地生态系统对全球气候变化响应的典型区域，但是目前针对气候因素对科尔沁草地牧草生长发育的研究较少。基于收集的牧草和气象观测资料，采用相关分析、积分回归等方法研究气温、降水、日照等气候因子对科尔沁草地北部优势牧草生长发育的影响，以期为提高牧业气象服务水平，合理利用草地、保护和恢复退化草地提供理论参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处科尔沁草地北部，隶属通辽市扎鲁特旗巴雅尔吐胡硕镇，属于温带半干旱气候，四季分明，冬季漫长寒冷，春季干旱多风，夏季温热短促，年平均气温3.25 ℃，年平均降水量419.69 mm，年日照时数2 982.68 h，年平均风速3.60 m·s^{-1}，全年无霜期111～200 d[10]。草地类型为山地灌丛草甸草原亚类，优势牧草为羊草、冰草（*Agropyron cristatum*）、针茅（*Stipa capillata*）、扁蓿豆（*Melissilus ru-*

① 收稿日期：2018-06-15； 修订日期：2018-12-19
基金项目：内蒙古自然科学基金项目（2018MS04001）；内蒙古气象局青年基金项目（nmqnqx201709）
作者简介：高亚敏（1984-），女，硕士研究生，主要从事生态与农牧业气象研究. E-mail：gaoyaminok@163.com

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊

thenicus)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

1.2 数据来源

研究数据来源于通辽市巴雅尔吐胡硕牧业气象试验站。物候资料选取羊草、冰草、委陵菜(*Potentilla chinensis*)物候数据;草层高度是8月末测量的群落高度;牧草产量是牧草地上生物量在8月末的地上干重,数据包括1990—2016年共27 a数据。气象资料选取1990—2016年每年逐旬平均气温、降水量和日照时数。

1.3 观测方法

牧草物候、草层高度、牧草产量观测按照国家气象局《农业气象观测规范:畜牧分册》进行观测。观测场为天然草地,设置围栏保护,面积为1 hm^2。在观测区内随机抽取4个样方,每个样方面积1 m×1 m,在每个观测小区每种植物选择10株,定点定株进行观测,返青期至枯黄期每2 d进行1次物候期观测。某物候期出现≥10%为初期,≥50%为普期,本文所用的物候期都是指普期[10]。草层高度于每月末测定1次。牧草产量是优势牧草生长高度>5 cm后,每月末在测产小区内抽取4个样方,分别取1 m×1 m的样地剪割后称重,直至枯黄期;牧草干重采用自然风干法测得。

1.4 研究方法

1.4.1 牧草生长季干燥指数[11]

$$G = C\frac{\sum T_{4-9}}{R} \tag{1}$$

式中:G为干燥指数,其值越大说明气候越干燥;反之,越湿润。$\sum T_{4-9}$是牧草生长季(牧草返青期至枯黄期的天数)≥0 ℃积温;R为同期的降水量;C为海拔高度订正系数,海拔≥2 000 m时,C值为0.32;海拔<2 000 m时,C值为0.28。

1.4.2 牧草产量 根据牧草产量影响因子的变化特点,可把牧草产量分解为牧草趋势产量和气象产量[12],前者的变化主要是由社会经济因子造成的,后者主要取决于气候因素。采用正交多项式方法拟合趋势产量,并由此计算逐年气象产量。

$$Y_c = Y - Y_t \tag{2}$$

式中:Y为实际牧草产量($kg \cdot hm^{-2}$);Y_c为牧草气象产量($kg \cdot hm^{-2}$);Y_t为牧草趋势产量($kg \cdot hm^{-2}$)。气象产量受气候条件的影响波动较大,有些年份为正值,有些年份为负值。

1.4.3 积分回归法[11-12] 数学模型为:

$$Y_c = C + \sum_{n-1}^{k}\int_0^t a_i(t)X_i(t)\mathrm{d}(t) \tag{3}$$

式中:Y_c为牧草气象产量;k为气象要素个数,$a_i(t)$为$t+vt$时刻的第i个气象要素每变化一个单位时对牧草产量的影响效果,即敏感系数;$X_i(t)$为$t+vt$时刻的第i个气象要素值;C为常数项。

1.4.4 相关分析法[10] 采用相关分析法分析两个要素之间的关系,相关系数取值为[−1,1],采用t检验进行显著性检验($P<0.05$)。

$$r = \frac{\sum_{i-1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i-1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i-1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{4}$$

式中:n为研究时段年数;X、Y为相关分析的两个变量;X_i、Y_i分别为其样本值。

1.4.5 统计分析[10] 采用Microsoft Office Excel和SPSS 19.0统计软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 科尔沁草地北部气候变化

1990—2016年科尔沁草地北部年均气温呈上升趋势(图1),气候倾向斜率为0.16 ℃·$(10a)^{-1}$,其中夏季(6—8月)和生长季(4—9月)气温呈极显著升高趋势($r=0.495$,$P<0.01$;$r=0.584$,$P<0.01$),气候倾向斜率分别为0.63 ℃·$(10a)^{-1}$和0.55 ℃·$(10a)^{-1}$。降水量呈减少趋势,平均减少23.96 mm·$(10a)^{-1}$。日照时数呈减少趋势,平均减少39.77 h·$(10a)^{-1}$。牧草生长季干燥指数呈增加趋势,线性拟合倾向率为0.15·$(10a)^{-1}$。近27 a研究区气候朝着暖、干趋势发展,草地干旱化加剧,对牧草生长发育十分不利。

2.2 物候期变化及其影响因素

科尔沁优势牧草羊草与冰草4月中下旬返青,5月下旬至6月上旬抽穗,6月中下旬开花,7月下旬至8月上旬成熟,9月中下旬枯黄;委陵菜4月下旬返青,7月上中旬花序形成,7月下旬开花,8月下旬成熟,9月上中旬枯黄。3种植物返青至枯黄需要120~160 d,≥5 ℃积温2 000~2 800 ℃,日照时数900~1 500 h,降水量300~450 mm。由于本地区降水少,蒸发量大,牧草生长主要依赖天然降水。

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊

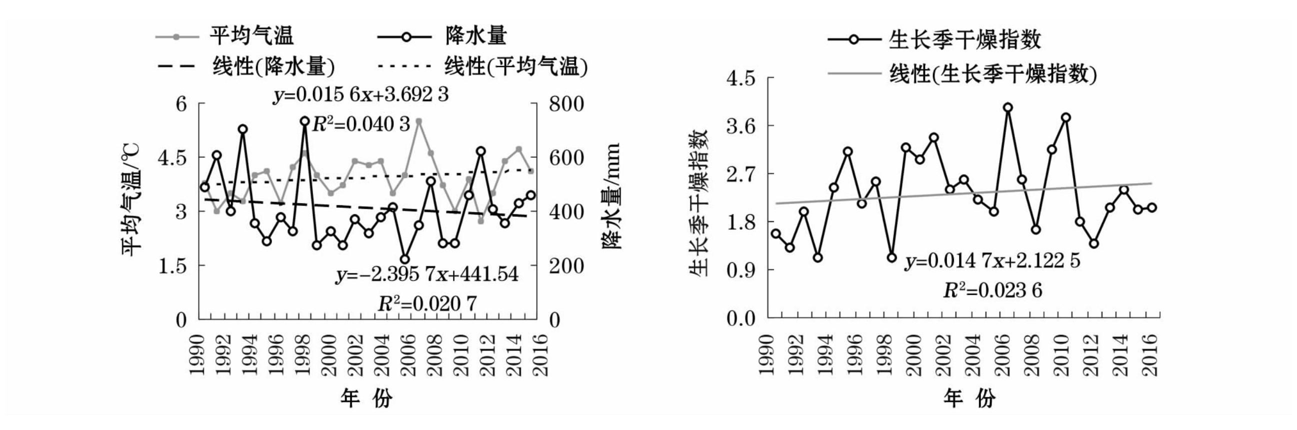


图 1 1990—2016 年科尔沁草地北部平均气温、降水量和牧草生长季干燥指数变化趋势

Fig. 1 The variation trends of the mean temperature, precipitation and drying index in herbage growing season in the study area from 1990 to 2016

表 1 草本植物物候期的线性趋势及其显著性水平

Tab. 1 Linear trends and significance level of phenological phase of herbaceous plants

草本植物	参数	返青期	开花期	枯黄期	生长季长度
羊草	k	0.675	-0.164	-0.241	-0.916
Leymus chinensis	r	0.537**	-0.175	-0.251	-0.567**
冰草	k	0.717	-0.051	0.026	-0.692
Agropyron cristatum	r	0.549**	-0.049	0.028	-0.447*
委陵菜	k	0.747	-0.223	-0.136	-0.883
Potentilla chinensis	r	0.528**	-0.251	-0.145	-0.524**

注：**表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关，*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。k 为斜率，r 为相关系数。下同。

由表 1 可以看出，3 种牧草返青期均呈极显著($P<0.01$)延迟趋势；开花期呈提前趋势；冰草的枯黄期呈略延迟趋势，羊草、委陵菜的枯黄期呈提前趋势。羊草、冰草和委陵菜生长季长度呈显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)缩短趋势，平均每年分别缩短 0.92 d、0.69 d 和 0.88 d。

降水量是影响羊草、冰草和委陵菜返青期的主要因素(表 2)。降水量与三者返青期呈负相关，即降水量增多可促进 3 种植物返青期的提前。羊草、冰草返青期与 2 月中旬、4 月中旬降水量呈显著的负相关($P<0.05$)，委陵菜返青期与 2 月中旬降水量呈显著的负相关($P<0.05$)。2 月中旬降水量每减少 1 mm，羊草、冰草和委陵菜返青期分别推迟 5.65 d、5.88 d 和 6.28 d。

气温、日照是影响羊草、冰草和委陵菜开花期的主要因素(表 2)。羊草开花期与 6 月中旬气温、7 月中旬日照时数呈显著的正相关($P<0.05$)；委陵菜开花期与 6 月中旬气温呈极显著的正相关($P<0.01$)，与 3 月下旬日照时数呈显著的负相关($P<0.05$)；冰草开花期与 7 月上旬气温呈显著的负相关($P<0.05$)。

降水量是影响羊草、冰草和委陵菜枯黄期的主要因素(表 2)。降水量与三者枯黄期呈正相关，即降水量增多可延长三者的枯黄期。羊草枯黄期与 6 月下旬降水量、冰草枯黄期与 8 月上旬降水量相关性显著($P<0.05$)，相应时段降水量每增多 1 mm，羊草、冰草枯黄期分别推迟 0.07 d、0.05 d。委陵菜枯黄期与 6 月下旬、8 月上旬降水量相关性显著($P<0.05$)。

由表 1 可知，冰草返青期推迟程度大于枯黄期，生长季长度缩短；羊草和委陵菜返青期推迟、枯黄期提前，生长季长度缩短。羊草、冰草和委陵菜生长季长度与夏季气温呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的负相关，与夏季、生长季降水量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关。气候变暖后，

表 2 影响植物物候期的主要因素

Tab. 2 The main factors affecting phenological phase of herbaceous plants

植物	羊草		冰草		委陵菜	
返青期	$R_{2中}$	-0.440*	$R_{2中}$	-0.433*	$R_{2中}$	-0.430*
	$R_{4中}$	-0.407*	$R_{4中}$	-0.413*		
开花期	$T_{6中}$	0.433*	$T_{7上}$	-0.380*	$T_{6中}$	0.505**
	$S_{7中}$	0.400*			$S_{3下}$	-0.400*
枯黄期	$R_{6下}$	0.381*	$R_{8上}$	0.378*	$R_{6下}$	0.410*
					$R_{8上}$	0.420*
生长季长度	$T_{夏}$	-0.522**	$T_{夏}$	-0.536**	$T_{夏}$	-0.565**
	$R_{夏}$	0.563**	$R_{夏}$	0.528**	$R_{夏}$	0.641**
	$R_{生长季}$	0.477*	$R_{生长季}$	0.459*	$R_{生长季}$	0.572**

注：$R_{2中}$、$R_{4中}$、$T_{6中}$、$S_{7中}$ 分别表示 2 月中旬降水量、4 月中旬降水量、6 月中旬平均气温、7 月中旬日照时数，以此类推。下同。

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊

研究区夏季平均气温极显著升高($r=0.495$,$P<0.01$),使羊草、冰草和委陵菜生长发育速度加快;而降水量逐渐减少,使三者对水分的需求加大,从而加快了三者的成熟进程,导致其生长季长度缩短[10]。

2.3 草层高度变化及其影响因素

科尔沁草地北部草层群落高度呈极显著下降趋势($P<0.01$),平均每年下降0.88 cm(表3)。分析气候因素与草层高度的相关关系,结果表明:气温对草层高度的影响均为负相关,降水量对草层高度的影响主要为正相关,说明科尔沁草地热量充足,在水分不足或长期缺水的情况下,气温过高可能使牧草高度生长速度减慢。夏季6月上中下旬、7月上中旬、8月上中旬平均气温对草层高度影响显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$),其中6月下旬平均气温每升高1 ℃,草层高度降低3.38 cm。6月下旬降水量对草层高度影响显著($P<0.05$),此时段降水量每减少1 mm,草层高度降低0.09 cm。

表3 草层高度线性趋势及其主要影响因子

Tab.3 The linear trends and main affecting factors of herbage height

线性趋势	草层高度	主要影响因子							
		$T_{6上}$	$T_{6中}$	$T_{6下}$	$T_{7上}$	$T_{7中}$	$T_{8上}$	$T_{8中}$	$R_{6下}$
k	-0.882	-1.691	-1.986	-3.379	-2.877	-2.503	-2.779	-2.724	0.085
r	-0.629**	-0.387*	-0.383*	-0.512**	-0.473*	-0.403*	0.392*	-0.381*	0.411*

2.4 牧草产量变化及其影响因素

牧草从返青至枯黄可以分为缓慢生长—积极生长—缓慢生长3个阶段,牧草产量年内呈单峰形曲线变化,一般在8月下旬牧草干草产量达到最大。随着优势牧草羊草、冰草生长季长度缩短、草层高度降低,8月末牧草产量呈极显著($r=0.754$,$P<0.01$)下降趋势,平均每年减产121.43 kg·hm^{-2}。气温和降水量是影响牧草产量的主要因素。气温与牧草产量主要呈负相关,6月下旬、7月上旬、7月中旬、8月上旬、8月中旬气温对牧草产量的影响显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)。降水量与牧草产量主要呈正相关,5月中旬、8月中旬降水量对牧草产量影响显著($P<0.05$)。在气候变暖背景下,气温升高、降水减少、干旱加重,不利于牧草产量的增加。

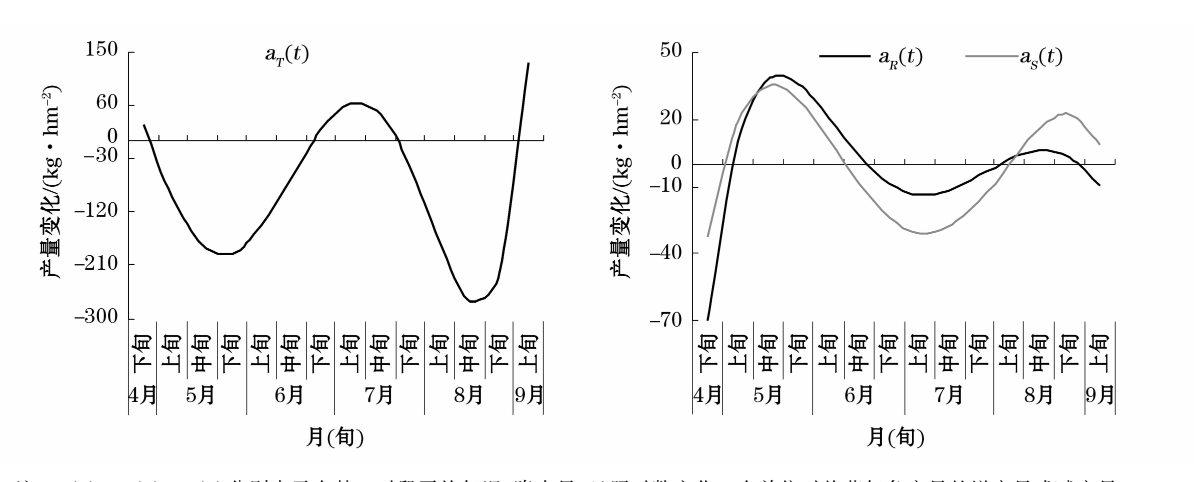
利用正交多项式法把牧草产量分解为牧草趋势产量和气象产量,然后将天然牧草全生育期4月下旬至9月上旬按旬分成14个生物时段($n=14$),利用逐步回归法建立牧草生物时段第一序列($n=14$)牧草产量积分回归方程。利用光、温、水的时间分布与牧草气象产量的敏感系数a_it[$a_T(t)$、$a_R(t)$、$a_S(t)$]绘制牧草气象产量变化率趋势图(图2),进一步分析每一关键时期气候对牧草气象产量影响的定量关系。

2.4.1 牧草缓慢生长期:返青—展叶(4月下旬至5月中旬) 从图2的$a_T(t)$、$a_R(t)$、$a_S(t)$值的变化趋势来看,4月下旬气温对牧草气象产量的影响为正效应;降水量、日照时数对牧草气象产量的影响为负效应,4月下旬降水量对牧草气象产量影响的负效应达到最大,说明科尔沁草地北部4月气温仍较低,降水天气多,使土壤温度降低,不利于牧草萌芽返青,此时段降水量在历年均值的基础上,每增加1个气象单位,牧草减产约70.15 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。5月上中旬,气温对牧草气象产量的影响为负效应,降水量、日照时数的影响为正效应,说明随着牧草返青生长,热量已相对满足,而牧草对水分、光照的需求逐渐增多。5月中旬降水量、日照时数对牧草气象产量的正效应达到最大,此时段降水量、日照时数在历年均值的基础上,每增加1个气象单位,牧草依次增产约37.85 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和34.98 kg·hm^{-2}·h^{-1}。

2.4.2 牧草积极生长期:拔节—开花(5月下旬至7月下旬) 5月下旬至6月中旬牧草进入拔节、抽穗期,此时雨季尚未来临,牧草生长主要依赖大气降水,降水的多少决定了牧草生长快慢。从积分回归的$a_T(t)$、$a_R(t)$、$a_S(t)$来看,气温对牧草气象产量的影响呈负效应,降水量、日照时数对牧草气象产量的影响呈正效应,说明随着牧草生长发育,热量基本满足牧草生长需要,但牧草对水分、光照需求增多,这在一定程度上又反映了高温、干旱导致牧草减产。6月下旬至7月下旬牧草进入抽穗、开花期,营养生长和生殖生长同期进行,叶面积系数大,光合作用强。此时气温对牧草气象产量的影响基本呈正效应,说明此时若有低温冷害发生,温度将影响牧草生长;而

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊



注：$a_T(t)$、$a_R(t)$、$a_S(t)$分别表示在某一时段平均气温、降水量、日照时数变化一个单位对牧草气象产量的增产量或减产量。

图2 牧草产量形成期间气温(T)变化1℃、降水量(R)变化1 mm和日照(S)变化1 h的影响效果

Fig. 2 Effects of temperature (T) changed for 1 ℃, precipitation (R) changed for 1 mm and sunshine duration (S) changed for 1 h during the period of herbage yield formation

降水量、日照时数对牧草气象产量的影响呈负效应，说明此阶段已进入雨季，雨热同期，水分、光照能满足牧草生长的需求。其中7月上旬气温、降水量、日照时数较历年均值每增(减)1个气象单位，依次增(减)产牧草约62.09 kg·hm^{-2}·℃$^{-1}$、13.66 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和30.82 kg·hm^{-2}·h^{-1}。

2.4.3 牧草缓慢生长期：灌浆—成熟(8月上旬至9月上旬) 8月牧草进入籽粒灌浆成熟期，生长缓慢。气温对牧草气象产量的影响呈负效应，降水量、日照时数对牧草气象产量的影响为正效应，说明此阶段气温较高、盛夏干旱是影响牧草产量的直接原因，由于干旱会使牧草提前枯黄，结束生长，造成牧草生长期缩短，产量降低。其中，8月中旬气温对牧草气象产量影响的负效应达到最大，此时段气温每增加1个气象单位，牧草减产约272.20 kg·hm^{-2}·℃$^{-1}$。9月上旬牧草进入枯黄期，气温、日照时数对牧草气象产量形成正效应，说明气温升高、日照时数增加可延长牧草生育期；降水量对牧草气象产量形成转为负效应，说明降水量基本能满足牧草生长的需求。

3 讨论

IPCC第五次报告指出，1983—2012年是北半球过去1 400 a来最热的30 a。中国气候变暖趋势与全球一致，1913年以来，中国地表平均温度上升了0.91 ℃[13]。在全球变暖背景下，内蒙古地区气候以旱化为主[14-15]。在B2排放情境下，未来2071—2100年内蒙古气候继续朝暖干化方向发展，增温将达3.5~5 ℃[16]；内蒙古地区平均降水量有所下降，且B2情景降幅大于A2情景[17]。本研究发现，近27 a来科尔沁草地北部气温显著升高，增温率为0.16 ℃·(10a)$^{-1}$；降水量呈减少趋势，平均减少23.96 mm·(10a)$^{-1}$。牧草生长季干燥指数平均增加0.15·(10a)$^{-1}$，草地干旱化加剧，与全球及内蒙古变暖的趋势一致。

目前，由全球变暖带来的水分、气温和光照等气候因子的变化，对植物的物候期已产生重要影响[18-20]，而且不同区域的不同物种、同一区域的不同物种，植物物候期对于气候变化的响应也不尽相同[21]。在内蒙古草原，羊草返青期和枯黄期均以显著提前的趋势占优势，多数站点生长季长度呈缩短趋势[22]；克氏针茅草原主要植物物候的变化是返青期推迟，其他物候期提前[19]。本研究表明科尔沁草地北部羊草、冰草和委陵菜返青期延迟，生长季长度缩短，这与陈效逑等[22]、李夏子等[23]的结论一致。

降水是影响牧草生长发育的主要因素，尤其对干旱半干旱生态系统，由于其年际和年内降水变率大，干旱抑制牧草生长；而气温升高会加剧水分蒸发，使土壤干旱，从而加重牧草需水的胁迫[24-25]。在青藏高原，气候变暖加剧蒸发，降水减少导致西藏半干旱草甸草原植物返青推迟[26]。在内蒙古温带草原区，年降水量增加能显著促进春季植物的萌芽和夏季最高生物量的到来，而年均温度起抑制作用；在内蒙古中部草原年降水量增加能明显延长草原植被的生长期[27]。本文的研究也表明，降水量是影响

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00032v1

科尔沁草地北部植物返青期和枯黄期的主要因子。羊草、冰草和委陵菜返青期与降水量主要呈负相关,降水量减少,使植物返青期推迟,其中 2 月中旬降水量每减少 1 mm,羊草、冰草、委陵菜返青期分别推迟 5.65 d、5.88 d 和 6.28 d。三者枯黄期与降水量主要呈正相关,降水量增多有利于植物枯黄期延迟,羊草枯黄期与 6 月下旬降水量、冰草枯黄期与 8 月上旬降水量相关性显著,委陵菜枯黄期与 6 月下旬、8 月上旬降水量相关性显著($P<0.05$)。气候变暖后,研究区夏季平均气温极显著升高($r=0.495$, $P<0.01$),降水量逐渐减少,使植物生长发育进程加快,生长季长度缩短[10]。

在气候变暖背景下,植物物候期发生变化,引起草层高度和产量等重要生长指标的改变,进一步导致草地生产力和生物多样性下降[7]。研究区草层高度呈极显著下降趋势($P<0.01$),平均每年下降 0.88 cm。气温对草层高度的影响均为负相关,降水量对草层高度的影响主要为正相关,说明科尔沁草地热量充足,在水分不足或长期缺水的情况下,气温过高可能使牧草高度生长速度减慢。这与青海兴海县牧草生长高峰期降水量是限制牧草生长的主导因素[7]的结论一致。

全球干旱区植被主要受降水的影响[28]。多个研究表明,降水是影响草地地上净初级生产力(ANPP)的主要气候因子[9,29],水分因子对牧草地上生物量的影响大于温度因子[9,30]。降水总量减少和降水变率增大使草地地上生物量降低,在干燥条件下,随着气温升高,草地地上生物量将进一步下降[31]。全球增温及降水波动,特别是植被生长旺盛期的夏季显著升温及干旱缺水是造成草地生产力下降的主要原因[32]。Denton 等通过控制堪萨斯州东北高草草原的降水量和干旱时间试验,发现干旱时间显著影响 ANPP,后期干旱的影响大于生长季早期的干旱[29]。本研究发现,研究区牧草产量呈极显著下降趋势($P<0.01$),平均每年减产 121.43 kg · hm^{-2}。气温和降水量是影响牧草产量的主要因素,气温与牧草产量主要呈负相关,降水量与牧草产量主要呈正相关,说明随着气温升高、降水减少,不利于牧草产量增加。在牧草生长发育过程中,气温敏感系数 $a_T(t)$ 变化趋势为两谷一峰形,降水量敏感系数 $a_R(t)$、日照时数敏感系数 $a_S(t)$ 为两峰一谷形,气温与降水量、日照时数的敏感系数变化趋势基本相反,说明科尔沁草地温、光、水资源匹配不同步。气温对牧草气象产量的影响负效应值大于正效应值,而降水量对牧草气象产量的影响正效应大于负效应,说明随着气候变暖,研究区牧草生长发育所需的热量满足,而水分需求增多,反映了春、夏季高温干旱对牧草生长发育具有较大的不利影响,水分胁迫成为牧草生长发育的主要限制因子。这与其他研究结论相一致[5-7,29-32]。

4 结 论

近 27 a 来科尔沁草原北部气候朝着暖、干趋势发展,特别是夏季显著增温及降水量逐渐减少,对牧草生长发育十分不利。羊草、冰草和委陵菜返青期延迟,开花期提前,枯黄期推迟或提前,3 种植物生长季长度缩短。降水量是影响植物返青期和枯黄期的主要因素,羊草、冰草和委陵菜返青期与降水量主要呈负相关,降水量减少,使植物返青期推迟;三者枯黄期与降水量主要呈正相关,降水量增多有利于植物枯黄期延迟。

草层群落高度呈极显著下降趋势($P<0.01$),平均每年下降 0.88 cm。牧草产量呈极显著下降趋势($P<0.01$),平均每年减产 121.43 kg · hm^{-2}。草层高度、牧草产量与气温因素主要呈负相关,与降水量因素主要呈正相关。在气候变暖背景下,气温升高、降水减少,不利于牧草生长发育和产量增加。

根据积分回归模型分析,在牧草返青—展叶期,气温对牧草气象产量的影响由正效应转为负效应;降水量、日照对牧草气象产量的影响从负效应到正效应变化,其中 5 月中旬牧草气气象产量的形成对降水量、日照时数变化十分敏感。牧草拔节—开花期,5 月下旬至 6 月中旬气温对牧草气象产量的影响呈负效应,水分、光照对牧草气象产量的影响呈正效应,反映了随着牧草积极生长,高温、干旱成为制约牧草产量的主要因子。牧草灌浆—成熟期,8 月气温对牧草气象产量的影响呈负效应,其中 8 月中旬气温对牧草气象产量影响的负效应达到最大;降水量、日照时数对牧草气象产量的影响为正效应,此阶段气温较高、盛夏干旱是影响牧草产量的直接原因。

参考文献(References):

〔1〕 梁艳,干珠扎布,张伟娜,等. 气候变化对中国草原生态系统影响研究综述〔J〕. 中国农业科技导报,2014,16(2):1-8.〔Li-

ChinaXiv合作期刊

ang Yan, Ganzhuzhabu, Zhang Weina, et al. A review on effect of climate change on grassland ecosystem in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(2): 1 – 8.]

[2] 徐大伟,陈宝瑞,辛晓平. 气候变化对草原影响的评估指标及方法研究进展[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2 183 – 2 190. [Xu Dawei, Chen Baorui, Xin Xiaoping. Advances in evaluation indices and methods to assess effects of climates changes on grassland ecosystem[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(11): 2 183 – 2 190.]

[3] 丁勇,侯向阳,吴新宏,等. 气候变化背景下草原生态系统研究热点探讨[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 124 – 132. [Ding Yong, Hou Xiangyang, Wu Xinhong, et al. The present research hotspots of grassland ecosystem under the background of climate change[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(5): 124 – 132.]

[4] 郭继勋,祝廷成. 气候因子对东北羊草草原羊草群落产量影响的分析[J]. 植物学报, 1994, 36(10): 790 – 796. [Guo Jixun, Zhu Tingcheng. Effect of climatic factors on the yield of *Aneurolepidium chinense* (Trin.) Keng community[J]. Acta Botanica Sinica, 1994, 36(10): 790 – 796.]

[5] 崔鲜一,彭玉梅,程渡. 科尔沁羊草—贝加尔针茅草原物候期和产草量与气象条件关系的研究[J]. 草地学报, 1996, 4(4): 302 – 307. [Cui Xianyi, Peng Yumei, Cheng Du. Relationships between yield of *Leymus chinesis* + *Stipa baicalensis* and meterology in Horqin grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 1996, 4(4): 302 – 307.]

[6] 郭连云,赵年武,田辉春. 气象影响因子对高寒针茅草原牧草产量的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 79 – 84. [Guo Lianyun, Zhao Nianwu, Tian Huichun. Effects of climates factors on pasture yield of alpine *Stipa* steppe[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(10): 79 – 84.]

[7] 吴让,韩炳宏,韩通,等. 青海省兴海县天然草地牧草生长发育与气候条件的关系[J]. 草业科学, 2017, 34(10): 1 991 – 1 998. [Wu Rang, Han Binghong, Han Tong, et al. The relations of natural grassland vegetation growth and climate conditions in Xinghai, of Qinghai Province[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 1 991 – 1 998.]

[8] 尹燕亭,侯向阳,运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1 132 – 1 139. [Yin Yanting, Hou Xiangyang, Yun Xiangjun. Advances in the climate change influencing grassland ecosystems in Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1 332 – 1 339.]

[9] 孙小龙,李平,张存厚,等. 镶黄旗典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. 中国草地学报, 2015, 37(5): 103 – 108. [Sun Xiaolong, Li Ping, Zhang Cunhou, et al. Responses of aboveground net primary productivity in typical steppe to climate change in Xianghuang Banner[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(5): 103 – 108.]

[10] 高亚敏. 气候变化对通辽草甸草原草本植物物候的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 423 – 433. [Gao Yamin. Impacts of climate change on phenological phase of herb in meadow grassland of Tongliao City, Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 423 – 433.]

[11] 姚玉璧,张秀云,段永良. 气候变化对亚高山草甸类草地牧草生长发育的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1 839 – 1 845. [Yao Yubi, Zhang Xiuyun, Duan Yongliang. Impacts of climate change on pasture growth in subalpine meadows[J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1 839 – 1 845.]

[12] 杨永岐. 农业气象中的统计方法[M]. 北京: 气象出版社, 1983: 142 – 152. [Yang Yongqi. Statistical Methods in Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1983: 142 – 152.]

[13] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-Mental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[14] Liu S L, Wang T. Climate change and local adaptation strategies in the middle Inner Mongolia, northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(5): 1 449 – 1 458.

[15] Chen Z J, Zhang X L, Cui M X, et al. Tree-ring based precipitation reconstruction for the forest-steppe ecotone in northern Inner Mongolia, China and its linkages to the Pacific Ocean variability[J]. Global and Planetary Change, 2012, 86 – 87(4): 45 – 56.

[16] 尤莉,许吟隆,荀学义. PRECIS 模式对内蒙古气候变化情景的模拟与分析[J]. 内蒙古气象, 2009(4): 3 – 6. [You Li, Xu Yinlong, Xun Xueyi. Simulating and analysis on the scenario of climate changing in Inner Mongolia based on PRECIS mode[J]. Meteorology Journal of Inner Monglia, 2009(4): 3 – 6.]

[17] 盛文萍,李玉娥,高清竹,等. 内蒙古未来气候变化及其对温性草原分布的影响[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1 111 – 1 119. [Sheng Wenping, Li Yu'e, Gao Qingzhu, et al. Climate change scenarios and their impact on the distribution of temperate grassland in Inner Monglia[J]. Resources Science, 2010, 32(6): 1 111 – 1 119.]

[18] 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候增暖对我国近 40 年植物物候变化的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(20): 1 584 – 1 587. [Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. The effect of climate change on plant phenology in late 40 years in China[J]. Science Bulletin, 2002, 47(20): 1 582 – 1 587.]

[19] 张峰,周广胜,王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原植物物候及其与气候因子关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1 312 – 1 322. [Zhang Feng, Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. Phenological calendar of *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China and its correlation with climatic variables[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1 312 – 1 322.]

[20] 王连喜,陈怀亮,李琪,等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 447 – 454. [Wang Lianxi, Chen Huailiang, Li Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 447 – 454.]

[21] Kramer K, Leinonen I, Loustau D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperature and mediterranean forest ecosystems: An overview[J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 67 – 75.

[22] 陈效逑,李倞. 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5 280 – 5 290. [Chen Xiaoqiu, Li Qiong. Relationships between *Leymus chinensis* phenology and meteorological factors in Inner Mongolia grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5 280 – 5 290.]

[23] 李夏子,韩国栋. 内蒙古东部草原优势牧草生长季对气象因子变化的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 987 – 992. [Li Xiazi, Han Guodong. Response of grass growing season to meteorological change in eastern Inner Mongolia grassland[J]. Chinese Jour-

chinaXiv:201909.00032v1

ChinaXiv合作期刊

nal of Ecology,2013,32(4):987－992.〕
〔24〕 徐敏云,高立杰,李运起.草地载畜量研究进展:参数和计算方法〔J〕.草业学报,2014,23(4):311－321.〔Xu Minyun,Gao Lijie,Li Yunqi. A review on grassland carrying capacity:Parameters and calculation methods〔J〕. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(4):311－321.〕
〔25〕 Sun J,Du W P. Effects of precipitation and temperature on net primary productivity and precipitation use efficiency across China's grasslands〔J〕. Giscience & Remote Sensing,2017,54(6):881－897.
〔26〕 Zhao G S,Shi P L,Zong N,et al. Declining precipitation enhances the effect of warming on phenological variation in a semiarid Tibetan meadow steppe〔J〕. Journal of Resources and Ecology,2017,8(1):50－56.
〔27〕 Zhou Y Z,Jia G S. Precipitation as a control of vegetation phenology for temperate steppes in China〔J〕. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2016,9(3):162－168.
〔28〕 郑艺,张丽,周宇,等.1982—2012年全球干旱区植被变化及驱动因子分析〔J〕.干旱区研究,2017,34(1):59－66.〔Zheng Yi,Zhang Li,Zhou Yu,et al. Vegetation change and its driving factors in global drylands during the period of 1982－2002〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):59－66.〕
〔29〕 Denton E M,Dietrich J D,Smith M D,et al. Drought timing differentially affects above- and belowground productivity in a mesic grassland〔J〕. Plant Ecology,2017,218(3):317－328.
〔30〕 张军,张彩琴,李茜若,等.内蒙古典型草原牧草生物量与气象因子的灰色关联优势分析〔J〕.干旱区资源与环境,2016,30(4):138－143.〔Zhang Jun,Zhang Caiqin,Li Qianruo,et al. Grey relational dominance analysis between biomass of herbs and the meteorological factors in Inner Monglia typical steppe〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(4):138－143.〕
〔31〕 Obermeier W A,Lehnert L W,Ivanov M A,et al. Reduced summer aboveground productivity in temperate C_3 grasslands under future climate regimes〔J〕. Earths Future,2018,6(5):716－729.
〔32〕 罗瑞敏,郭梁,程积民.近20年云雾山草地生产力对气候变化的响应〔J〕.干旱区研究,2018,35(1):77－84.〔Luo Ruimin,Guo Liang,Cheng Jimin. Responses of grassland productivity to climate change in the Yunwu Mountain in recent 20 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):77－84.〕

chinaXiv:201909.00032v1

Effects of Climatic Factors on Herbage Growth in the North Horqin Grassland

GAO Ya-min

(*Tongliao Meteorological Bureau*, *Tongliao* 028000, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: The data of herbage growth and its affecting meteorological factors at Enkhbayar Animal Husbandry Meteorological Experiment Station in Tongliao were used to analyze the climatic factors affecting the herbage growth in the northern Horqin grassland. Results indicated that the average temperature in the study area in recent 27 years increased by 0.16 °C · (10a)$^{-1}$, the average precipitation decreased by 23.96 mm · (10a)$^{-1}$, the dryness index in herbage growing season increased by 0.15 (10a)$^{-1}$, and the drought in the grassland became more serious. Moreover, the period of seedling establishment of *Leymus chinensis*, *Agropyron cristatum* and *Potentilla chinensis* was delayed, the flowering stage of which was in advanced, and the growth season of which was shortened. Precipitation was the main factor affecting the period of seedling establishment and withering stage of the three plant species, it was negatively correlated with the period of seedling establishment but positively correlated with the withering stage of the three plant species. The herbage height and yield were significantly decreased ($P<0.01$), and the decreases were 0.88 cm and 121.43 kg · hm^{-2} per year respectively. The herbage height and yield were mainly negatively correlated with temperature, but positively correlated with precipitation. Under climate warming, water has become more and more important for the herbage growth in the study area. The analysis with the integral regression model showed that the positive effects of precipitation and sunshine duration in mid-May on the herbage yield were the highest from the period of seedling establishment to the leaf expansion stage. The jointing stage and flowering stage from late-May to mid-June were the main stages for the herbage growth of demanding precipitation and sunshine, and the period from late-June to mid-July was the main stage for herbage growth of demanding heat. The effect of air temperature on herbage yield was negative in August, especially in mid-August.

Key words: climatic factor; herbage growth; phenological phase; herbage yield; Horqin grassland